Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 3, Fall 2022, p. 319-329

Analysis of Energy of Diesel Engine using Diesel and Biodiesel Fuel Mixtures Containing Graphene Oxide Nanoparticles

M. Eshaghi Pireh[1], M. Gholami Par-Shokohi[1*], D. Mohammad Zamani[1]

1- Department of Biosystems Engineering, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran
(*- Corressponding Author Email: gholamihassan@yahoo.com)
DOI: 10.22067/jam.2021.67098.0

Received: 17-11-2020 Revised: 24-05-2021 Accepted: 02-06-2021 Available Online: 02-06-2021	**How to cite this article:** Eshaghi Pireh, M., M. Gholami Parashkoohi, and D. MohammadZamani. 2022. Analysis of Energy of Diesel Engine using Diesel and Biodiesel Fuel Mixtures Containing Graphene Oxide Nanoparticles. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 319-329. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.2021.67098.0

Introduction

Biodiesel is an eco-friendly renewable alternate fuel and is made from transesterification of vegetable oils and animal fat. The use of biodiesel fuel as a strategy to conserve energy and reduce emissions is becoming increasingly important in engines. Biodiesel fuels increase NOx emissions in the engines. Compensate for the negative effect, the use of particles additive can be a reliable solution. In this study, the state of heat balance in a single-cylinder, four-stroke diesel engine with different fuel combinations with DXBYGZ formula (X % diesel fuel, Y % biodiesel mass, and Z ppm graphene oxide nanoparticles), has been studied experimentally.

Materials and Methods

Graphene nanoparticles in three levels of 30, 60, and 90 ppm were mixed with biodiesel produced from cooking waste oil by transesterification method with volume percentages of 5 and 20% and pure diesel was used. The test engine was a diesel engine, single-cylinder, four-stroke, compression ignition, and water cooling, in the laboratory of renewable energies of agricultural faculty, Moghadas Ardabili University. The engine is connected to a dynamometer and data were obtained after reaching steady state conditions. In thermal balance study, the combustion process merely as a process intended to free up energy fuel, and the first law of thermodynamics is used. The energy contained in the fuel is converted to useful and losses energies by combustion. Useful energy measured by dynamometer as brake power and losses energy including exhaust emission and cooling system losses. Variance analysis of all engine energy balance was done by split-plot design based on a completely randomized design and the means were compared with each other using the Duncan test at 5% probability.

Results and Discussion

The results showed that by adding 60 ppm of graphene oxide and 20% biodiesel to diesel fuel, the useful output power is reduced to a minimum and is reduced by about 5.52%. The results of the model evaluation of useful power, exhaust emissions, and thermal losses in the cooling system showed that the exponential model had a better fit. By adding biodiesel and graphene oxide nanoparticles to diesel fuel, the useful power was reduced. In order to achieve the maximum useful output power and with the priority of adding biodiesel to a high amount, the fuel composition of D80B20G90 had relatively better conditions. By adding 30 ppm of graphene to pure diesel fuel, the equivalent power of exhaust fumes was reduced to a minimum of about 18.5%. In general, heat loss through the cooling system in pure diesel fuel (D100) was lower than other fuel compounds. Pure diesel fuel was recognized as the best fuel mixture due to having the highest useful power, and lowest energy losses in the form of exhaust fumes and through cooling.

Conclusion

By adding graphene oxide to pure diesel fuel, the useful output power was reduced to a minimum. With the increase of biodiesel to diesel fuel, the amount of power of the cooling system also increased. By adding graphene oxide to pure diesel fuel, the equivalent power of the exhaust fumes was reduced. Heat loss through the cooling system increased with the increase of nano-graphene and biodiesel.

Keywords: Biodiesel, Energy, Graphene oxide, Modeling, Nanoparticles

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۳۲۹-۳۱۹

تحلیل انرژی موتور دیزل با استفاده از مخلوط‌های سوختی دیزل و بیودیزل حاوی نانو ذرات اکسید گرافن

میثم اسحقی پیره[۱]، محمد غلامی پرشکوهی[۱*]، داوود محمدزمانی[۱]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۲

چکیده

در این تحقیق وضعیت تعادل گرمایی در یک موتور دیزل تک سیلندر، چهار زمانه و آب‌خنک با کاربرد نانوذرات اکسید گرافن در مخلوط‌های سوختی دیزل- بیودیزل بررسی شد. نانوذرات اکسید گرافن در سه سطح ۳۰، ۶۰ و ۹۰ پی‌پی‌ام به مخلوط‌های بیودیزل-دیزل (نسبت‌های حجمی صفر، ۵ و ۲۰ درصد بیودیزل) اضافه شد. آزمایش‌ها در شرایط بار کامل و سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه انجام شد. نتایج ارزیابی مدل پیش‌بینی توان مفید خروجی، توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز و توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده نشان داد که مدل نمایی برازش بهتری داشت. با افزودن بیودیزل و نانو ذرات اکسید گرافن به سوخت دیزل توان مفید کاهش یافت. به‌طوری‌که با افزودن ۶۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن و ۲۰ درصد بیودیزل به سوخت دیزل، توان مفید خروجی به کمترین مقدار خود رسیده و در حدود ۵/۵۲ درصد کاهش یافت. به‌منظور دستیابی به بیشترین توان مفید خروجی و با اولویت افزودن بیودیزل به مقدار بالا، ترکیب سوختی ۹۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن و ۲۰ درصد بیودیزل به‌طور نسبی دارای شرایط بهتری بود. با افزودن ۳۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن به سوخت دیزل خالص، توان معادل دود اگزوز به کمترین مقدار خود رسیده و در حدود ۱۸/۵ درصد کاهش یافت. در حالت کلی تلفات گرمایی از طریق سیستم خنک‌کننده در سوخت دیزل خالص نسبت به سایر ترکیبات سوختی پایین‌تر بود.

واژه‌های کلیدی: اکسید گرافن، انرژی، بیودیزل، مدل‌سازی، نانو ذرات

مقدمه

سوختن سوخت‌های فسیلی منجر به انتشار آلاینده‌های مختلفی در هوا می‌شود که برای محیط‌زیست و بهداشت عمومی مضر است. لذا مضرات استفاده از سوخت‌های فسیلی موجب افزایش توجه به سوخت‌های جایگزین شده است. یکی از منابع پایدار که به‌طور گسترده‌ای در موتورهای احتراق داخلی استفاده می‌شود بیودیزل است که از مواد اولیه مختلف، از جمله روغن‌های گیاهی، روغن‌های حیوانی، روغن پخت و پز، روغن میکرو جلبک و غیره به‌دست می‌آید (Abbasi *et al.*, 2018). بیودیزل از واکنش بین تری گلیسیرید و الکل در حضور کاتالیزور به‌دست می‌آید. ترکیبات شیمیایی سوخت بیودیزل مشابه سوخت‌های فسیلی است (Bavafa, 2014).

کاهش منابع انرژی‌های فسیلی همراه با تشدید قوانین زیست‌محیطی برای کنترل آلاینده‌های خروجی موتور، استفاده از سوخت‌های پاک‌تر و تجدیدپذیر را اجتناب ناپذیر کرده است. از این‌رو، استفاده از سوخت بیودیزل هم به‌عنوان راهکاری برای حفظ منابع انرژی و هم کاهنده آلاینده‌ها اهمیت بسیاری در موتورها پیدا کرده است (Said *et al.*, 2015). از طرفی دیگر، سوخت بیودیزل باعث افزایش آلاینده اکسیدهای نیتروژن (NOx) در موتورها می‌شود (Gharehghani, 2020).

تحقیقات زیادی در زمینه وضعیت تحلیل انرژی با کاربرد سوخت‌های مختلف در موتورهای درون‌سوز انجام شده است. در تحقیقی وضعیت موازنه انرژی در یک موتور دیزل تک سیلندر هوا خنک با استفاده از مخلوط‌های سوختی دیزل- بیودیزل بررسی شد. نتایج نشان داد سهم تلفات انرژی از طریق دود اگزوز بیشترین مقدار را در همه درصدهای بیودیزل دارا بود (۵۱/۷۱ درصد) که بیشترین مقدار مربوط به بیودیزل ۴۲ درصد (۵۵/۹۸ درصد) و کمترین مقدار مربوط به دیزل خالص (۴۶/۴۸۱ درصد) بود (Abbasi *et al.*, 2018).

در مطالعه‌ای به‌منظور بررسی تعادل گرمایی یک موتور دیزل چهار سیلندر با کاربرد سوخت‌های دیزل و بیودیزل حاصل از روغن پالم و جاتروفا با نسبت‌های ۱۰ و ۲۰ درصد حجمی، نتایج نشان داد که مخلوط ۱۰ و ۲۰ درصد حجمی به‌ترتیب برای بیودیزل روغن پالم و

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: gholamihassan@yahoo.com)
DOI: 10.22067/jam.2021.67098.0

جاتروفا منجر به تولید بیشتر تلفات گرمایی آب خنک‌کننده نسبت به دیزل خالص شد. همچنین، تلفات گرمایی از طریق دود اگزوز برای ۱۰ درصد حجمی بیودیزل برای هر دو روغن پالم و جاتروفا نسبت به دیزل خالص کاهش یافت (Abedin *et al.*, 2015).

در پژوهشی دیگر افزودن نانو ذرات روی‌اکساید (ZnO) به ترکیب سوخت هیدروژن و بیودیزل در یک موتور دوگانه‌سوز بیان‌گر این بوده است که اندازه نانوذرات بر روی میزان بهبود بازده موتور اثرگذار است (Vellaiyan and Amirthagadeswaran, 2016). همچنین بررسی انجام شده بر روی سوخت دیزل دارای نانوذرات آلومینیوم (Al) نشان‌دهنده بیشتر بودن نرخ آزادسازی حرارت و در نتیجه افزایش آلاینده اکسیدهای نیتروژن (NOx) است (Mitchell *et al.*, 2008). در تحقیقی دیگر افزودن نانوذرات سریم‌اکساید (CeO_2) به ترکیب سوخت دیزل- بیودیزل باعث بهبود فرآیند احتراق و در نتیجه بهبود راندمان حرارتی شد (Khalife *et al.*, 2017). با توجه به موارد گفته‌شده، استفاده همزمان از افزودنی‌های آب و نانوذرات، می‌تواند راه‌حل مطمئنی برای کاهش آلاینده‌ها و و نیز بهبود راندمان کاهش مصرف سوخت باشد. قره‌خانی و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که استفاده از نانو مواد اکسید کبالت (Co_3O_4) با قطر بین ۱۰ تا ۳۰ نانومتر به سوخت دیزل در بهبود راندمان حرارتی موتور موثر می‌باشد (Gharehghani *et al.*, 2015).

در تحقیقی تاثیر افزودن نانوذرات آلومینا (Al_2O_3) بر روی عملکرد و آلایندگی یک موتور دیزل تک سیلندر بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن این نانوذرات سبب بهبود قابل‌توجهی در بازده حرارتی ترمزی می‌شود (Prabu *et al.*, 2017). حسینی و همکاران (Hosseini *et al.*, 2017) تأثیر افزودن Al_2O_3 CO با دوزهای ۹۰،۶۰،۳۰ پی‌پی‌ام به مخلوط سوخت B5 و B10 بر پارامترهای مختلف موتور و انتشار گازهای خروجی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که گشتاور، توان، مصرف ویژه سوخت، بازده حرارتی سوخت $B_{10}Al_{90}$ به‌ترتیب با ۵/۳۶+،۵/۳۶+، ۱۰/۶۳+ و ۱۴/۶۶- درصد در مقایسه با سوخت دیزل خالص متفاوت است. در تحقیقی اثر مستقل سه افزودنی نانوذرات سیلیکا، آلومینا و لوله‌های کربنی به سوخت بیودیزل بر عملکرد و انتشار آلاینده موتور دیزل تک سیلندر بررسی شد. نتایج نشان داد مصرف ویژه سوخت تا ۱۹/۸ درصد افزایش و بازده حرارتی ترمزی تا ۱۸/۸ درصد بهبود یافت. همچنین، آن‌ها دریافتند که افزودنی نانوسیلیکا نسبت به نانوآلومینا نتایج بهتری را در مشخصه‌های موتور از قبیل فشار احتراق، مصرف سوخت، انتشار CO نشان داده است (Chen *et al.*, 2018). جبرائیلی و همکاران (Jabraeili *et al.*, 2020) تاثیر افزودن نانوکامپوزیت Al_2O_3-SiO به سوخت بیودیزل-دیزل بر روی عملکرد و آلایندگی یک موتور دیزلی را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که نانوذرات سیلیکا نسبت به نانوذرات آلومینا باعث بهبودی بیشتر در عملکرد موتور دیزلی و کاهش آلاینده‌ها شد.

اگرچه در مطالعات زیادی اثر افزودن بیودیزل و نانوذرات به سوخت دیزل از دیدگاه عملکرد و آلایندگی بررسی شده است اما مطالعه از دیدگاه انرژی در این زمینه بسیار محدود است. مطالعه حاضر با هدف ارزیابی تحلیل انرژی، عملکرد و آلایندگی موتور دیزل با کاربرد بیودیزل تولید شده از روغن پسماند خوراکی به روش ترانس استریفیکاسیون و نیز استفاده از نانو اکسید گرافن می‌باشد که به‌صورت مخلوط با سوخت دیزل و در بار کامل و سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند با در نظر گرفتن نتایج سایر مطالعات از نظر منبع تهیه ماده اولیه، درصد نانو ذرات اضافه شده، نسبت اختلاط بیودیزل و دیزل مورد استفاده و در جهت کاهش بحران انرژی مورد استفاده قرار گیرد. مطالعه موازنه انرژی در واقع راه‌های اتلاف انرژی و مقدار آن‌ها را به‌منظور کاهش تلفات و افزایش بازده موتور نشان می‌دهد.

مواد و روش‌ها

مواد

در این مطالعه ۱۲ نوع مخلوط سوختی دیزل- بیودیزل- نانوذرات اکسید گرافن انتخاب شد. سوخت شاهد مورد استفاده همان دیزل بود که با علامت اختصاری D نشان داده شد (سوخت دیزل شماره ۲ موجود در جایگاه‌های سوخت کشور). سوخت بیودیزل مورد استفاده با علامت اختصاری B بوده که در دو سطح ۵ و ۲۰ درصد حجمی مورد استفاده قرار گرفت. برای تولید بیودیزل از روغن‌های پسماند خوراکی استفاده شد. ویژگی‌های مهم سوخت بیودیزل با استاندارد ASTM D-6751-09 مطابقت داشت. نانوذرات مورد استفاده نیز اکسید گرافن با علامت اختصاری G بوده که پس از خریداری از شرکت تماداکالا در سه سطح ۳۰، ۶۰ و ۹۰ پی‌پی‌ام مورد استفاده قرار گرفت. مخلوط سوختی در پژوهشکده انرژی‌های تجدیدپذیر دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی با استفاده از حمام مافوق صوت (Backer vCLEAN1-L4Ultrasonic Cleaner) به مدت ۳۰ دقیقه در فرکانس ۲۸kHz ترکیب و در نهایت با استفاده از دستگاه هموژنایزر به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شدند (Gharehghani, 2020). جدول ۱ تیمارهای آزمایش را نشان می‌دهد. آزمایش‌ها در شرایط بار کامل و سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه انجام شد.

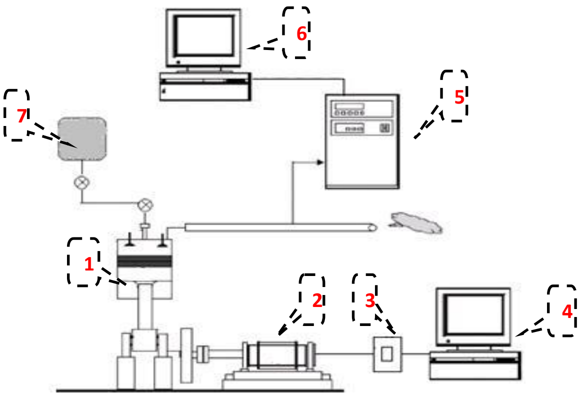
تجهیزات

تجهیزات مورد لستفاده برای انجام آزمون‌های موتور شامل موتور دیزل، دینامومتر، دستگاه آلاینده‌سنج AVL DITEFT (MDF418)، اتاق کنترل موتور (اعمال تغییرات در شرایط کاری موتور، ثبت و نمایش داده‌های مربوط به موتور) بود (شکل ۱).

جدول ۱- تیمارهای آزمایش

Table 1- Experimental treatments

اکسید گرافن (پی‌پی‌ام) **Graphene oxide(ppm)**	بیودیزل (درصد حجمی) **Biodiesel (volume percentage)**	دیزل (درصد حجمی) **Diesel (volume percentage)**	تیمار **Treatment**
0	0	100	D_{100}
30	0	100	$D_{100}G_{30}$
60	0	100	$D_{100}G_{60}$
90	0	100	$D_{100}G_{90}$
0	5	95	$D_{95}B_{5}$
30	5	95	$D_{95}B_{5}G_{30}$
60	5	95	$D_{95}B_{5}G_{60}$
90	5	95	$D_{95}B_{5}G_{90}$
0	20	80	$D_{80}B_{20}$
30	20	80	$D_{80}B_{20}G_{30}$
60	20	80	$D_{80}B_{20}G_{60}$
90	20	80	$D_{80}B_{20}G_{90}$



شکل ۱- طرحواره تجهیزات آزمایشگاهی تست موتور (۱- موتور مورد آزمایش، ۲- دینامومتر، ۳- کنترل از راه دور، ۴- سامانه داده‌گیری مربوط به عملکرد موتور، ۵- دستگاه آنالیز دود، ۶- سامانه داده‌گیری مربوط به آلایندگی موتور و ۷- مخزن سوخت)

Fig. 1. Schematic engine test lab equipment (1- Engine tested, 2- Dynamometer, 3- Remote control, 4- Data backup system of engine performance, 5- Smoke analyzer, 6- Data backup system of exhaust emissions and 7- Fuel tank)

سامانه اندازه‌گیری مصرف سوخت شامل باک، اتصالات، لوله‌های انتقال سوخت، حسگر اندازه‌گیری حجمی مصرف سوخت، مبدل‌های خنک‌کننده سوخت برگشتی از موتور، مبدل‌های کنترل فشار سوخت، سنجه فشار سوخت و حسگر اندازه‌گیری دمای سوخت بود (دقت اندازه‌گیری این سامانه ۱± سی‌سی بر ساعت بود).

موتور تحت آزمایش در این مطالعه یک موتور دیزلی تک سیلندر، چهار زمانه و آب‌خنک ساخت کارخانه کرلوسکار[1] بود. برای اعمال بار بر موتور و اندازه‌گیری توان مفید، این موتور به یک دینامومتر الکتریکی جریان گردابی مدل Dyno D400 متصل شد و بعد از رسیدن موتور به شرایط پایدار، داده‌برداری انجام شد.

موازنه انرژی

در تحلیل انرژی، فرآیند احتراق به صورت فرآیندی برای آزاد کردن انرژی سوخت در نظر گرفته شده و از قانون اول ترمودینامیک برای محاسبه آن استفاده شد. انرژی موجود در سوخت موتور در اثر احتراق به‌صورت انرژی‌های مفید و تلف‌شده تبدیل می‌شود. به‌طوری‌که بخشی از آن به توان مفید خروجی و بقیه به‌صورت تلفات گرمایی از طریق آلاینده‌های خروجی اگزوز، سیستم خنک‌کننده موتور و تلفات گرمایی غیرقابل کنترل دفع می‌گردد. رابطه (۱) معادله مربوط به موازنه انرژی موتور را به‌صورت توان در بخش‌های مختلف نشان می‌دهد (Abbasi *et al.*, 2018). در بررسی تعادل گرمایی، فرآیند احتراق فقط به‌صورت فرآیندی برای آزاد کردن انرژی سوخت در نظر گرفته شده و از قانون اول ترمودینامیک به‌صورت رابطه (۱) استفاده شد.

1- Kirloskar

$$\dot{Q}_{fuel} = P_b + \dot{Q}_{exh} + \dot{Q}_{cooling} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، $\dot{Q}_{fuel}$، P_b، $\dot{Q}_{exh}$ و $\dot{Q}_{cooling}$ به‌ترتیب توان معادل سوخت مصرفی، توان ترمزی (توان مفید)، توان معادل تلف‌شده آلاینده‌های خروجی اگزوز و توان معادل تلف‌شده از طریق سیستم خنک‌کننده بر حسب کیلووات می‌باشند.

توان معادل انرژی گرمایی کل همان توان معادل انرژی شیمیایی سوخت است که طی فرآیند احتراق به گرما تبدیل می‌شود. توان معادل انرژی گرمایی کل با استفاده از ارزش گرمایی سوخت و دبی جرمی آن از رابطه (۲) محاسبه شد (Yuksel and Ceviz, 2002).

$$\dot{Q}_{fuel} = \dot{m}_f + \dot{Q}_{LHV.f} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، $\dot{m}_f$ و $\dot{Q}_{LHV.f}$ به‌ترتیب دبی جرمی سوخت ($kg.sec^{-1}$) و ارزش حرارتی پایینی سوخت ($kJ.kg^{-1}$) می‌باشند.

توان خروجی (P_b) در واقع توان روی چرخ لنگر بر حسب کیلووات است که با استفاده از سرعت دورانی (n) بر حسب دور در دقیقه و گشتاور (T) اندازه‌گیری شده به‌وسیله دینامومتر بر حسب نیوتون‌متر از رابطه (۳) محاسبه شد (Yuksel and Ceviz, 2002):

$$P_b = \frac{2\pi.n.T}{60000} \qquad (۳)$$

به دلیل اختلاف دمای دود خروجی و دمای محیط، دود خروجی دارای گرمای محسوس است. چون دود خروجی مخلوط گازی است، لذا با فرض ایده‌آل بودن آن از الگوی دالتون در تعیین گرمای محسوس استفاده می‌شود. تلفات گرمایی آلاینده‌های خروجی اگزوز با استفاده از تغییرات آنتالپی در فشار ثابت و دمای متوسط اگزوز (میانگین دمای اگزوز و محیط) و دبی جرمی آلاینده‌های خروجی اگزوز از رابطه (۴) محاسبه شد (Taymaz, 2003).

$$\dot{Q}_{exh} = \dot{m}_{exh} \times \overline{C}_{p.g} \times \Delta T_{exh.} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، ΔT عبارت است از اختلاف دمای دود خروجی و محیط (°k) و $\dot{m}_{exh}$ نیز دبی جرمی گازهای خروجی از اگزوز بر حسب ($kg.sec^{-1}$) که با استفاده از مجموع دبی جرمی هوا و سوخت ورودی به موتور (رابطه ۵) محاسبه شد.

$$\dot{m}_{exh} = \dot{m}_a + \dot{m}_f \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، $\dot{m}_a$ دبی جرمی هوا ($kg.sec^{-1}$) بود.هم‌چنین در رابطه (۴)، $\overline{C}_{p.g}$ گرمای ویژه متوسط گازهای خروجی اگزوز در فشار ثابت و دمای متوسط اگزوز بر حسب ($kj.kg^{-1}.°K^{-1}$) می‌باشدکه با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شد:

$$\overline{C}_{p.g} = \sum_{i=1}^{n} (C_{p.i} \times X_i / 100) \qquad (۶)$$

در رابطه (۶)، $C_{p.i}$ و X_i به‌ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه هر آلاینده در فشار ثابت و درصد آن در مخلوط گازهای خروجی اگزوز بودند.

گازهایی که درصد آن‌ها با استفاده از آلاینده‌سنج به‌دست آمد، گرمای ویژه آن‌ها نیز در دمای متوسط اگزوز از جداول ترمودینامیک استخراج شد. باقی‌مانده گازهای خروجی اگزوز نیز با توجه به این که قابل اندازه‌گیری نبوده و شباهت زیادی به هوا دارند، از گرمای ویژه هوا در دمای متوسط استفاده شد (Özcan and Söylemez, 2006).

تلفات انرژی به‌صورت گرمای منتقل شده به سیال خنک‌کننده با توجه به این‌که موتور تحت آزمایش در این مطالعه از نوع هوا خنک بوده و سیستم خنک‌کاری آن بر اساس دمش هوا توسط یک فن در بدنه موتور می‌باشد، لذا انرژی منتقل شده به این سیال شامل تلفات گرمایی به تلفات گرمایی به‌صورت انتقال حرارت جابه‌جایی و تابش از بدنه موتور می‌باشد) بر اساس پایستگی انرژی در موتور با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شد (Abedin *et al.*, 2015):

$$\dot{Q}_{cooling} = \dot{Q}_{fuel} - (P_b + \dot{Q}_{exh}) \qquad (۷)$$

پس از ثبت داده‌های مربوط به پارامترهای عملکرد و محاسبه موازنه انرژی در موتور مورد آزمایش، اجزای موازنه انرژی موتور در قالب طرح آماری اسپلیت پلات و بر اساس طرح پایه کاملاً تصادفی تجزیه واریانس شده و با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد مورد مقایسه میانگین قرار گرفتند.

مدل‌سازی اجزای تعادل گرمایی موتور

با توجه به این‌که یافتن مقادیر بهینه بیودیزل و نانوذرات در مورد اجزای تعادل گرمایی موتور یکی از اهداف اصلی این تحقیق بود لذا، محاسبه مقادیر بهینه مستلزم مدل‌سازی اجزای تعادل گرمایی (۱- توان مفید خروجی، ۲- تلفات توانی به‌صورت دود اگزوز و ۳- تلفات توانی از طریق سیستم خنک‌کننده) بر اساس مقادیر مختلف بیودیزل، نانوذرات و مصرف ویژه‌ی سوخت می‌باشد. لذا، به‌منظور یافتن بهترین مدل ریاضی در راستای پوشش وضعیت کاری موتور، مدل‌سازی اجزای تعادل گرمایی با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS16 انجام گرفت. این مدل‌ها شامل مدل‌های مختلف کلاسیک (شامل: مدل خطی درجه اول، مدل لگاریتمی، مدل معکوس، مدل درجه دوم، مدل درجه سوم، مدل توانی، مدل ترکیبی، مدل اس، مدل رشد و مدل نمایی) و غیرکلاسیک (با در نظر گرفتن ترکیبات خطی و غیرخطی متغیرهای مربوط به درصد بیودیزل و سرعت موتور با اشکال نمایی و مثلثاتی) بودند. به‌منظور دستیابی به مدلی که بتواند اجزای تعادل گرمایی موتور را با حداقل خطا پیش‌بینی نماید، از پارامترها و آزمون‌های استاندارد یعنی ضریب تبیین، آزمون F، آزمون معنی‌داری ضرایب، آزمون ناهمسانی واریانس، آزمون ریشه میانگین مربعات خطا (*RMSE*) و آزمون استقلال خطا استفاده شد. هم‌چنین در انتخاب مدل مورد نظر، سادگی، مشتق‌پذیر بودن و پیوستگی مدل‌ها نیز جزو شاخص‌های انتخاب بودند. لازم به توضیح است که ریشه میانگین

مربعات خطا با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{obs.,i} - x_{pred.,i})^2}{n}} \quad (۸)$$

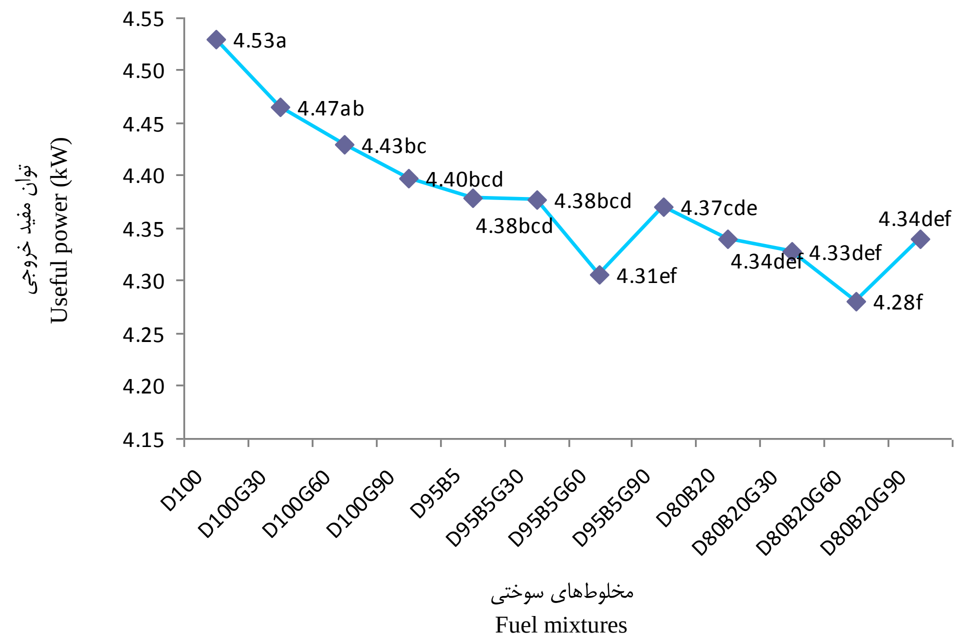
در رابطه (۸)، n، x_{obs} و $x_{pred.}$ به‌ترتیب تعداد نمونه، مقدار مشاهده شده (واقعی) و مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل بودند.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس مربوط به تأثیر بیودیزل و اکسید گرافن بر موازنه انرژی موتور مورد مطالعه، کاربرد بیودیزل بر توان مفید خروجی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده ولی بر توان معادل دود اگزوز و توان معادل تلف‌شده از طریق سیستم خنک‌کننده معنی‌دار نبود. همچنین کاربرد نانوذرات اکسید گرافن بر هیچ‌یک از اجزای تعادل گرمایی معنی‌دار نبود.

توان مفید خروجی

شکل ۲ تغییرات توان مفید با افزودن بیودیزل و نانواکسید گرافن به سوخت دیزل را نشان می‌دهد. تیمارهای D_{100} و $D_{80}B_{20}G_{60}$ به‌ترتیب با ۴/۵۳ و ۴/۲۸ کیلووات دارای بیشترین و کمترین توان مفید خروجی بودند. به بیان دیگر، با افزودن ۶۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن و ۲۰ درصد بیودیزل به سوخت دیزل، توان مفید خروجی به کمترین مقدار خود رسیده و در حدود ۵/۵۲ درصد کاهش یافت. مطابق شکل ۲، با افزودن نانو ذرات اکسید گرافن به سوخت پایه دیزل مقدار توان مفید روند نزولی داشته و بیشترین کاهش آن در مقدار ۹۰ پی‌پی‌ام از اکسید گرافن بود. در بین ترکیبات مختلف بیودیزل و اکسید گرافن، ترکیبات $D_{95}B_5G_{90}$ و $D_{80}B_{20}G_{90}$ دارای بیشترین توان مفید خروجی به‌ترتیب برابر ۴/۳۷ و ۴/۳۴ کیلووات بوده و اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، به‌منظور دستیابی به بیشترین توان مفید خروجی و با اولویت افزودن بیودیزل به مقدار بالا، ترکیب سوختی $D_{80}B_{20}G_{90}$ به‌طور نسبی دارای شرایط بهتری بود. کاهش کیفیت احتراق علت کاهش توان ترمزی با افزایش بیودیزل و نانو اکسید گرافن بود. با افزودن بیودیزل و ذرات نانو اکسید گرافن در مخلوط سوخت موجب کاهش ارزش حرارتی آن شده و منجر به کاهش توان مفید شد. عباسی و همکاران (Abbasi *et al.*, 2018) نیز نشان دادند با افزایش بیودیزل، ابتدا توان مفید تا حدود ۱۲ درصد افزایش یافته که به دلیل غالب بودن جرم حجمی بیشتر بیودیزل و در نتیجه افزایش بازده حجمی موتور بود که احتراق کامل‌تر را در پی داشت. لیکن با افزایش بیشتر بیودیزل، توان ترمزی کاهش یافت که به دلیل غلبه ارزش حرارتی کمتر بیودیزل بود. محققان دیگری نیز نتایج مشابه این تحقیق گزارش نموده‌اند (Rostami *et al.*, 2010; Mrad *et al.*, 2012).



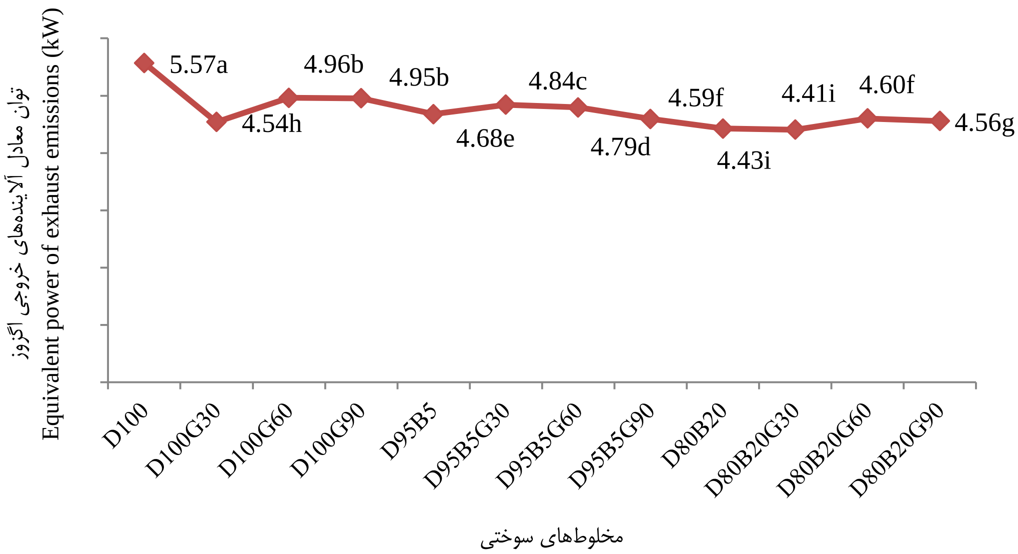
شکل ۲- تغییرات مربوط به توان مفید خروجی با کاربرد مخلوط‌های سوختی مختلف

Fig. 2. The variations of useful power using different fuel mixtures

توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز

شکل ۳ تغییرات توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز را با کاربرد بیودیزل و نانواکسید گرافن به سوخت دیزل را نشان می‌دهد. تیمارهای D_{100} و $D_{100}G_{30}$ به‌ترتیب با ۵/۵۷ و ۴/۵۴ کیلووات دارای بیشترین و کمترین توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز بودند. به بیان دیگر، با افزودن ۳۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن به سوخت دیزل خالص، توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز به کمترین مقدار خود رسیده و در حدود ۱۸/۵ درصد کاهش یافت.

مطابق نتایج به‌دست آمده، تفاوت اصلی از نظر توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز بین ترکیب سوختی ۳۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن در دیزل خالص ($D_{100}G_{30}$) با سایر تیمارها بود که در این میان همان‌گونه که گفته شد ترکیب سوختی $D_{100}G_{30}$ دارای کمترین توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده، به‌منظور دستیابی به کمترین توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز و با اولویت افزودن بیودیزل به مقدار نسبتا بالا، ترکیب سوختی $D_{80}B_{20}G_{30}$ به‌طور نسبی دارای شرایط بهتری بوده و توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز آن نسبت به سایر ترکیبات سوختی کمترین مقدار یعنی ۴/۴۱ کیلووات بود. اضافه کردن بیودیزل به سوخت دیزل در دو نسبت ۵ و ۲۰ درصد حجمی سبب کاهش تلفات اگزوز نسبت به دیزل خالص شده است از دلایل آن می‌توان به حضور اکسیژن در ساختار بیودیزل و ارزش حرارتی پایین‌تر نسبت به سوخت دیزل اشاره نمود. عباسی و همکاران (Abbasi *et al.*, 2018) در تحقیق خود نشان دادند که با افزودن ۳۲ درصد بیودیزل به دیزل خالص، حدود ۱۰ درصد توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز نسبت به بیودیزل ۲۲ و ۱۲ درصد افزایش می‌یابد و با افزایش بیودیزل به ۴۲ درصد مجددا کاهش داشت. دلایل این محققان غلبه گرانروی بالاتر بیو دیزل به‌خصوص در درصدهای بالاتر بود که موجب کاهش اتمیزه شدن سوخت در هنگام پاشش و در نتیجه احتراق ناقص شد که در نهایت تولید دود بیشتر را به همراه داشت ماگنو و همکاران (Magno *et al.*, 2015) نیز نتیجه مشابه تحقیقات عباسی و همکاران گزارش نمودند.



شکل ۳– تغییرات مربوط به توان معادل الاینده‌های خروجی اگزوز با کاربرد مخلوط‌های سوختی مختلف

Fig. 3. The variations of equivalent power of exhaust emissions using different fuel mixtures

توان معادل تلف شده از طریق سیستم خنک‌کننده

شکل ۴ تغییرات توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده را با کاربرد مخلوط های سوختی مختلف نشان می‌دهد. تیمارهای D_{100} و $D_{100}G_{30}$ به‌ترتیب با ۳/۷۶ و ۶/۹۴ کیلووات دارای کمترین و بیشترین توان معادل خنک‌کننده بودند. تلفات گرمایی از طریق سیستم خنک‌کننده در سوخت دیزل خالص (D_{100}) نسبت به سایر ترکیبات سوختی پایین‌تر بود. با افزودن ۳۰ پی‌پی‌ام نانواکسید گرافن به سوخت دیزل خالص توان معادل تلفات گرمایی خنک‌کننده در حدود ۸۴/۶ درصد افزایش یافت. از طرف دیگر با توجه به شکل ۴ در حالتی که تنها نانواکسید گرافن به دیزل خالص اضافه شود، روند توان معادل تلفات گرمایی خنک‌کننده رفته رفته نسبت به مخلوط سوختی با نانو اکسید گرافن ۳۰ پی‌پی‌ام ($D_{100}G_{30}$) کاهش یافت. به بیان دیگر، توان معادل خنک‌کننده در $D_{100}G_{90}$ نسبت به $D_{100}G_{30}$ در حدود ۱۶/۸۶ درصد کاهش پیدا نمود. همچنین در حالت استفاده توام

از نانواکسید گرافن و بیودیزل، شرایط تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده تا حدودی متفاوت شده و با افزودن ۵ درصد بیودیزل به همراه ۳۰ پی‌پی‌ام نانواکسید گرافن به سوخت دیزل خالص ($D_{95}B_5G_{30}$)، توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده مقدار کمتری نسبت به $D_{100}G_{30}$ داشته که برابر ۴/۹۳ کیلووات بود. از طرف دیگر، در انتخاب ترکیبات سوختی به‌منظور داشتن تلفات گرمایی کمتر در بخش خنک‌کننده با اولویت کاربرد بیودیزل، ترکیب سوختی با ۲۰ درصد بیو دیزل و ۶۰ پی‌پی‌ام نانواکسید گرافن ($D_{80}B_{20}G_{60}$) بهترین شرایط را داشته و با ۵/۴۳ کیلووات توان معادل تلفات گرمایی خنک‌کننده، شرایط قابل‌قبولی را دارا بود.

با افزایش بیودیزل به سوخت دیزل مقدار توان سیستم خنک‌کننده افزایش یافت. یکی از دلایل این پدیده اثر گرانروی بیشتر بیودیزل در پاشش سوخت بود که منجر به کاهش کیفیت احتراق و در نتیجه تولید آلایندگی بیشتر شده که آن هم موجب افزایش دمای بدنه موتور شد. عباسی و همکاران (Abbasi *et al.*, 2018) نیز در تحقیق خود نشان دادند افزایش بیودیزل ابتدا تا ۱۲ درصد باعث کاهش جزئی در توان معادل تلفات گرمایی خنک‌کننده شده و پس از آن با شدت بیشتری افزایش پیدا کرد.

مدل‌سازی ریاضی توان مفید خروجی

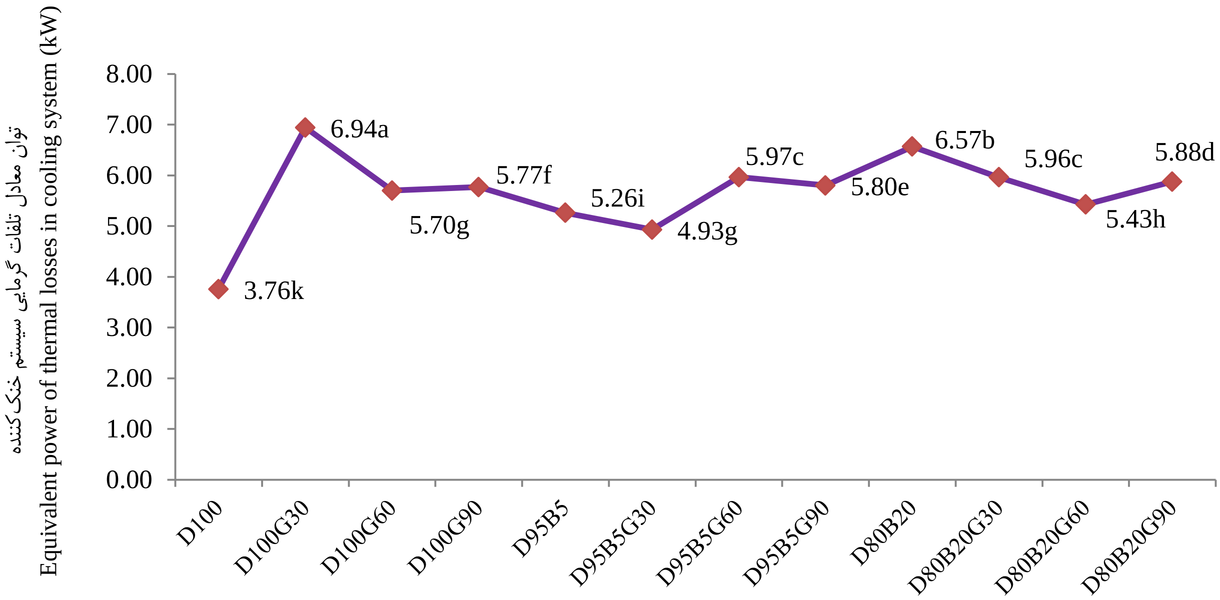
نتایج تجزیه واریانس و ارزیابی مدل پیش‌بینی توان مفید خروجی، توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز و توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده نشان داد که مدل نمایی برازش بهتری داشت و نتایج آن در جدول ۲ ارائه شد.

جدول ۳ وضعیت ارزیابی ضرایب رگرسیونی مدل پیش‌بینی توان مفید خروجی را نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۳، دو تا از ضرایب مربوط به مدل پیش‌بینی توان مفید خروجی معنی‌دار بوده و به‌طور نسبی مصرف ویژه‌ی سوخت در افزایش توان مفید بیشترین تاثیر منفی را داشت. همچنین با توجه به پایین بودن مقدار میانگین عامل تورم واریانس (VIF)[1]، متغیرهای مستقل دارای مشکل هم‌خطی با یکدیگر نبوده و مقادیر پیش‌بینی مدل اختلاف معنی‌داری با مقادیر واقعی نداشت. آزمون نرمال داده‌ها در خصوص توان مفید خروجی نشان داد که به‌طور تقریبی منطبق با شرایط نرمال بود. پراکندگی مقادیر خطا در مدل تخمین زده شده به‌طور تقریبی مستقل از مقادیر پیش‌بینی در این مدل بوده و ضمن وجود تقارن حول نقطه صفر (در محور افقی)، منطبق با طرح خاصی نبود. به بیان دیگر، مدل تخمین‌زده شده برای توان مفید خروجی موتور از نظر آزمون ناهمسانی واریانس نیز مورد تایید بوده و اختلاف معنی‌داری در مقادیر توان مفید خروجی در تکرارهای مختلف آزمایش وجود نداشت.

ارزیابی مدل پیش‌بینی توان معادل تلف‌شده از طریق گازهای خروجی اگزوز در موتور مورد آزمایش در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق با جدول ۴، کلیه ضرایب مربوط به مدل پیش‌بینی توان معادل تلف‌شده از طریق گازهای خروجی معنی‌دار بود. هم‌چنین با توجه به مقدار میانگین عامل تورم واریانس (*VIF*) که پایین بود، متغیرهای مستقل تقریباً مشکل هم‌خطی با یکدیگر نداشته و مقادیر پیش‌بینی مدل اختلاف معنی‌داری با مقادیر واقعی نداشت. همچنین پراکندگی مقادیر واقعی در مورد توان معادل تلف شده از طریق گازهای خروجی به‌طور تقریبی منطبق با شرایط نرمال بود. پراکندگی مقادیر خطا در مدل تخمین زده شده به‌طور تقریبی مستقل از مقادیر پیش‌بینی در این مدل بوده و منطبق با طرح خاصی نبود. به بیان دیگر، مدل تخمین زده شده برای توان معادل تلف‌شده از طریق گازهای خروجی موتور از نظر آزمون ناهمسانی واریانس نیز مورد تایید بوده و اختلاف معنی‌داری در مقادیر توان معادل تلف‌شده از طریق گازهای خروجی در تکرارهای مختلف آزمایش وجود نداشت. به این ترتیب با توجه به شاخص‌ها و پارامترهای آماری در ارزیابی مدل تخمین زده شده، مدل انتخاب شده برای پیش‌بینی توان معادل تلف‌شده از طریق گازهای خروجی قابل‌قبول بوده و دارای خطای معنی‌داری در برآورد این جزء از تعادل گرمایی موتور نخواهد بود.

ارزیابی مدل پیش‌بینی توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده در جدول ۵ ارائه شده است. کلیه ضرایب مربوط به مدل پیش‌بینی توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده معنی‌دار بود. با توجه به مقدار میانگین عامل تورم واریانس (*VIF*) که تقریبا نزدیک به یک بود، متغیرهای مستقل به‌طور تقریبی مشکل هم‌خطی با یکدیگر نداشته و مقادیر پیش‌بینی مدل اختلاف معنی‌داری با مقادیر واقعی نداشت. پراکندگی مقادیر واقعی در مورد توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده به‌طور تقریبی منطبق با شرایط نرمال بود. پراکندگی مقادیر خطا در مدل تخمین زده شده به‌طور تقریبی مستقل از مقادیر پیش‌بینی در این مدل بوده و ضمن وجود تقارن حول نقطه صفر (در محور افقی)، منطبق با طرح خاصی نبود. به بیان دیگر، مدل تخمین زده شده برای توان تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده از نظر آزمون ناهمسانی واریانس نیز مورد تایید بوده و اختلاف معنی‌داری در مقادیر توان تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده در تکرارهای مختلف آزمایش وجود نداشت. به این ترتیب با توجه به شاخص‌ها و پارامترهای آماری در ارزیابی مدل تخمین زده شده، مدل انتخاب شده برای پیش‌بینی توان تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده قابل‌قبول بوده و دارای خطای معنی‌داری در برآورد این جزء از تعادل گرمایی موتور نخواهد بود.

1- Variance Inflation Factor



شکل ٤– تغییرات مربوط به توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده با کاربرد مخلوط‌های سوختی مختلف

Fig. 4. The variations of equivalent power of thermal losses in cooling system using different fuel mixtures

جدول ۲– مدل پیش‌بینی توان مفید خروجی، آلاینده‌های خروجی اگزوز و تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده

Table 2- Forecasting model of useful power, exhaust emissions and thermal losses in cooling system

ریشه میانگین مربعات خطا Root Mean Squar of Error	آزمون F F test	ضریب تعیین R^2	مدل ریاضی Mathematical model	توان Power
0.050	3.459*	0.48	$P_b = \exp[2.311 - 0.145\ln(bsfc) - 0.013\sin(bsfc) - 0.0000014e^{Nano} + 0.009\, arctg(Nano^2)]$	مفید خروجی Useful
0.028	29.93**	0.891	$\dot{Q}_{exh} = \exp\begin{bmatrix}1.704 + 0.097\ln(Nano) - 0.082\, Sin(Nano)\\ -0.031Cos(bsfc)\end{bmatrix}$	آلاینده‌های خروجی اگزوز Exhaust emissions
0.043	32.48**	0.844	$\dot{Q}_{cooling} = \exp[-12.457 - 0.119\ln(Nano) + 2.54\ln(bsfc)]$	تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده Thermal losses in cooling system

bsfc: مصرف ویژه‌ی سوخت ترمزی ($gr.kWh^{-1}$)

Brake specific fuel consumption ($gr.kWh^{-1}$) :bsfc

Nano: نانواکسید گرافن (پی‌پی‌ام)

Nano: **Graphene nanoparticles** (ppm)

* و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ درصد

*, and **: it was significant at the 1 and 5% level, respectively

جدول ۳– ارزیابی مدل پیش‌بینی توان خروجی موتور

Table 3- Estimation of useful power forecasting model

هم‌خطی *VIF*	ارزش P *p-value*	ضریب استاندارد شده بتا Standardized beta coefficient	ضریب Coefficient	متغیر مستقل Independent variable
-	0.000	-	2.311	Constant ثابت
1.333	0.062	-0.433	-0.145	*Ln(bsfc)*
1.196	0.020	-0.530	-0.013	*Sin(bsfc)*
1.228	0.444	-0.162	-0.0000014	e^{Nano}
1.276	0.105	0.363	0.009	$Arctan(Nano^2)$

جدول ٤- ارزیابی مدل پیش‌بینی توان معادل آلاینده‌های خروجی اگزوز

Table 4- Estimation of exhaust emissions power forecasting model

هم‌خطی *VIF*	ارزش P *p-value*	ضریب استاندارد شده بتا Standardized beta coefficient	ضریب Coefficient	متغیر مستقل Independent variable
-	0.000	-	1.704	Constant ثابت
1.471	0.000	0771	0.097	*Ln(Nano)*
1.152	0.000	-0.906	-0.082	*Sin(Nano)*
1.457	0.014	-0.351	-0.031	*Cos(bsfc)*

جدول ۵- ارزیابی مدل پیش‌بینی توان معادل تلفات گرمایی سیستم خنک‌کننده

Table 5- Estimation of thermal losses in cooling system power forecasting model

هم‌خطی *VIF*	ارزش P *p-value*	ضریب استاندارد شده بتا Standardized beta coefficient	ضریب Coefficient	متغیر مستقل Independent variable
-	0.000	-	-12.457	Constant ثابت
1.019	0.007	-0.378	-0.119	*Ln(Nano)*
1.019	0.000	0.891	2.54	*Ln(bsfc)*

نتیجه‌گیری

با افزودن نانوذرات اکسید گرافن به سوخت دیزل خالص، توان مفید خروجی به کمترین مقدار خود رسید. با افزایش بیودیزل به سوخت دیزل مقدار توان سیستم خنک‌کننده افزایش یافت. ترکیب سوختی ۶۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن با مخلوط سوخت بیودیزل و دیزل خالص کمترین توان مفید را داشت. به‌منظور دستیابی به بیشترین توان مفید خروجی و با اولویت افزودن بیودیزل به مقدار بالا، ترکیب سوختی ۹۰ پی‌پی‌ام اکسید گرافن و ۲۰ درصد بیودیزل به‌طور نسبی دارای شرایط بهتری بود. با افزودن نانو ذرات اکسید گرافن به سوخت دیزل خالص، توان معادل دود اگزوز کاهش یافت. با افزایش بیودیزل به سوخت دیزل مقدار توان سیستم خنک‌کننده افزایش یافت. در حالت کلی تلفات گرمایی از طریق سیستم خنک‌کننده در سوخت دیزل خالص نسبت به سایر ترکیبات سوختی پایین‌تر بود.

References

1. Abbasi, S., H. Bahrami, B. Ghobadian, and M. Kiani Deh Kiani. 2018. Energy analysis of a diesel engine using diesel and biodiesel from waste cooking oil. Journal of Agricultural Machinery 8 (1): 149-157. (In Persian). DOI: http://dx.doi.org/10.22067/jam.v8i1.58988.
2. Abedin, M. J., H. H. Masjuki, M. A. Kalam, A. Sanjid, and S. M. A. Rahman. 2015. Thermal balancing of a multi-cylinder diesel engine operating on diesel, B5 and palm biodiesel blends. Journal of Clean Energy Technologies 3: 115-118. DOI: 10.7763/JOCET.2015.V3.178.
3. Chen, A. F., M. A. Adzmi, A. Adam, M. F.Othman, M. K. Kamaruzzaman, and A. G. Mrwan. 2018. Combustion characteristics, engine performances and emissions of a diesel engine using nanoparticle-diesel fuel blends with aluminium oxide, carbon nanotubes and silicon oxide. Energy Conversion and Management 171: 461-477. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.004.
4. Bavafa, M. 2014. Biodiesel production of fowl fatness oil and evaluation of diesel-biodiesel fuel blends on performance and exhaust emissions parameters in a diesel engine. Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian).
5. Gharehghani, A. 2020. Experimental Investigation of the Effect of Nano-particle Concentrations on the First and Second Laws efficiency in CIengine fueled with Diesel/Biodiesel blend. Modares Mechanical Engineering 20 (8): 2009-2016. 20.1001.1.10275940.1399.20.8.17.2.
6. Gharehghani, A., R. Hosseini, M. Mirsalim, S. A. Jazayeri, and T. Yusaf. 2015. An experimental study on reactivity controlled compression ignition engine fueled with biodiesel/natural gas. Energy 89: 558-567. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.014.
7. Hosseini, S. H., A. Taghizadeh-Alisaraei, B. Ghobadian, and A. Abbaszadeh-Mayvan. 2017. Effect of Added Alumina as Nano-Catalyst to Diesel-Biodiesel Blends on Performance and Emission Characteristics of CI Engine. Energy 124: 543-552. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.109.
8. Jabraeili, M., R. Pourdarbani, B. Najafi, and A. Nematlahzadeh. 2020. Investigation of the impact of SiO_2_Al_2O_3 nano-composite to biodiesel-diesel fuel on performance and emission of a diesel engine. Fuel and Combustion 13 (2): 25-39. (In Persian).

9. Khalife, E., M. Tabatabaei, A. Demirbas, and M. Aghbashlo. 2017. Impacts of additives on performance and emission characteristics of diesel engines during steady-state operation. Progress Energy and Combustion Science 59: 32-78. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.10.001.
10. Mrad, N., E. G. Varuvel, M. Tazerout, and F. Aloui. 2012. Effects of biofuel from fish oil industrial residue-Diesel blends in diesel engine. Energy 44: 955-963. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.056.
11. Mitchell, M. R., R. E. Link, M. J. Kao, C. C. Ting, B. F. Lin, and T. T. Tsung. 2008. Aqueous aluminum nano fluid combustion in diesel fuel. Journal of Testing and Evaluation 36 (2): 503-512. DOI: 10.1520/JTE100579.
12. Özcan, H., and M. Söylemez. 2006. Thermal balance of a LPG fuelled, four stroke SI engine with water addition. Energy Conversion and Management 47: 570-581. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.05.019.
13. Prabu, A., and R. B. Anand. 2015. Emission control strategy by adding alumina and cerium oxide nano particle in biodiesel. Journal of the Energy Institute 89 (3): 366-372. https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.03.003.
14. Rostami, S., B. Ghobadian, L. Savadkouhi, and R. Ebrahimi. 2010. Experimental investigation effect of injection pressure on performance in a diesel engine using diesel and biodiesel blends. Journal of Engine Research 6: 73-82. (In Persian).
15. Said, N. H., F. N. Ani, and M. F. M. Said. 2015. Review of the production of biodiesel from waste cooking oil using solid catalyst. Journal of Mechanical Engineering and Sciences 8: 1302-1311. DOI: 10.15282/jmes.8.2015.5.0127.
16. Taymaz, I. 2003. An experimental study of energy balance in low heat rejection diesel engine. Energy 31: 364-371. https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.02.004.
17. Vellaiyan, S., and K. S. Amirthagadeswaran. 2016. Zinc oxide incorporated water-in-diesel emulsion fuel: Formulation, particle size measurement, and emission characteristics assessment. Petroleum Science Technology 34 (2): 114-122. https://doi.org/10.1080/10916466.2015.1122621.
18. Yuksel, F., and M. A. Ceviz. 2002. Thermal balance of a four stroke SI engine operating on hydrogen as a supplementary fuel. Energy 28: 1069-1080. https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00090-2.